

# 高調波関連技術の現状と展望

岡崎 金造(おかざき きんぞう)

## 1 まえがき

私たちの暮らしは、いろいろな面で安定した電力の供給とその有効利用によって支えられている。また、経済性や安全性に対する社会的な要求に加え、利便性や快適性に対する欲求の高まりの多くが、その利用技術の革新的な進歩によって満たされ続けてきた。電気への依存度は、ますます加速されるであろう利用技術の開発と適用によって、21世紀においては現在以上に高くなると考えられる。

しかしながら、新しい技術や製品の有用性が広範に利用されるときに何らかの弊害を派生させることは、車社会の充実に伴う種々の現象の例を見るように、電気利用においても例外ではない。電気は津々浦々に張り巡らされた電力供給網を介して供給されているが、道路網によく似たこの供給網の電圧・電流が、電気機器の発生する高調波電流によって波形のひずんだ状態となり、この結果供給網に接続された機器が誤動作や異常加熱などを引き起こすという高調波障害の増加が、弊害の一つとして懸念されている。

高調波電流の発生とその障害については古くから研究されており、その対策も必要に応じて講じられてきた。近年では、電力制御用のいわゆるパワーエレクトロニクス技術が社会のあらゆる場所でごく一般的に利用されるようになり、その応用製品から発生する高調波の総量も強い増加傾向を示している。この傾向は高調波対策に関する技術が必要かつ重要であることを意味している。

本特集では産業向けの技術を中心として、富士電機の高調波関連技術と、製品例・対策例について紹介する。

## 2 高調波の規制と抑制対策の動向

### 2.1 従来の規制と抑制対策の実施

従来、高調波の抑制と対策は主に特定の大口需要家に対するやや特有の課題であった。大容量の直流電源を要するかせいソーダやアルミニウムなどの電解プロセスおよび電

気鉄道の直流電源などがその代表例であり、サイリスタやダイオードを利用し交流から直流に変換する順方向電力変換装置からの発生量は理論的に解明され、ほとんどのプラントが対策を講じたものとなっている。また、製鋼用のアーク炉はアークの非線形特性などに起因した高調波発生が顕著であるが、発生のメカニズムと発生量の関係を理論的に数式化することが困難なため統計手法によって発生量を予測する試みがなされ、その結果を利用して必要な対策が講じられている。

高調波対策の必要度は、需要家内やその近傍における局所的な障害対策を除けば、ほとんどが電力供給側からの要に基づくものであり、主に供給網と需要家の接続点における高調波電圧ひずみ率や、高調波流出電流が規制の指標として利用してきた。また電気鉄道や一部の例では、通信線への障害を避ける必要から等価妨害電流やIT積などの指數が規制の指標として採用されてきている。このほかの指標としては、発電機への影響をはかるための等価逆相電流への換算法などがあるが、いずれの場合も特別のケースを除けば、発生量が指標を超過して初めて対策に迫られるので、抑制と対策が上述のように大電力を使用する特定の分野に集中しているゆえんでもある。

以上の状況から各指標の運用や指標ごとの規制値も、地域性を帯びたものになりがちであったが、電力供給側・需要側が個別に協議のうえ必要な対策を講じることにより、障害の顕在化を防止してきている。

### 2.2 抑制対策の今後の動向

高調波に関する近年の傾向は、発生源が工場などで使用される機器にとどまらず、業務用の複写機や照明器具およびテレビやルームエアコンなどの家庭用機器に至るまでの広い範囲に分散してきたことである。これらの機器は単一の負荷容量は小さく、単一の発生量は無視できるほどであるが、使用台数が圧倒的に多く普及が広がるにつれ電力供給網に与える影響が顕在化していく。冒頭に触れたようにこれらの機器に機能・性能の向上を目的とした最新のパワー半導体デバイスが数多く応用され始めたことも一因で

### 岡崎 金造

産業向け大容量電源プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、システム事業本部産業システム事業部技術第二部長。



ある。

高調波の実態調査や研究および対策の検討は(社)電気学会や(社)電気協同研究会、(社)日本電気協会を中心として長年にわたり続けられてきたが、このままの状態で推移した場合、数年後の21世紀初頭における電力供給網の電圧ひずみ率は、機器の許容限度を超えることが予測され高調波の総量規制が環境維持のために必要であるとしている。

このような背景のもとで、1994年9月に通商産業省資源エネルギー庁により「高調波抑制対策ガイドライン」が制定され、抑制対策が公平性をもって推進できることになった。この動きはわが国に限ったことではなく、国際的にも同じ方向にあり、その内容も同じようなものとなっている。ガイドラインは家電・汎用品を対象としたものと高圧または特別高圧で受電する需要家を対象としたものが同時に公表されているが、後者の内容の基本は表1に示すように、需要家から系統に流出する高調波電流許容上限値を需要家の契約電力1kWあたりごとに定めて抑制するものである。

この上限値の制定は、高調波環境レベルの目標値として高圧配電系統における総合電圧ひずみ率を5%，特別高圧系統における総合電圧ひずみ率を3%とし、将来においてもこの値以下を維持するために、流出する高調波電流の量を1/2に抑制することを基準にしている。

ガイドラインは需要家が高調波発生機器を新設、増設または更新する場合に適用されるが、需要家の構内に低減装置が設置されている場合には、その効果を考慮することができる。なお、ガイドラインに沿って対策を実施するにあたっては、(社)日本電気協会電気技術基準調査委員会発行の「高調波抑制対策技術指針 JEAG 9702-1995」に防止策を含めて詳述されているので参考されたい。

### ③ パワーエレクトロニクスの進歩と高調波

パワーエレクトロニクスは電気を商用周波以外の直流や高周波あるいは任意の波形で利用したり、電力の流れを調節する技術であり、商用周波の電力を直流や異なる周波数あるいは直流を任意の周波数の電力に変換するなどの電力変換技術およびその制御技術を意味している。

表1 契約電力1kWあたりの高調波流出電流上限値

受電電圧	次 数 5次	7次	11次	13次	17次	19次	23次	23次 超過
6.6kV	3.5	2.5	1.6	1.3	1.0	0.9	0.76	0.70
22kV	1.8	1.3	0.82	0.69	0.53	0.47	0.39	0.36
33kV	1.2	0.86	0.55	0.46	0.35	0.32	0.26	0.24
66kV	0.59	0.42	0.27	0.23	0.17	0.16	0.13	0.12
77kV	0.50	0.36	0.23	0.19	0.15	0.13	0.11	0.10
110kV	0.35	0.25	0.16	0.13	0.10	0.09	0.07	0.07
154kV	0.25	0.18	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05
220kV	0.17	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
275kV	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02

(単位: mA/kW)

この電力変換の過程において、変換素子は商用周波の正弦波に対して非線形的に振る舞うことから、正弦波の波形にひずみを伴うことは避け得ない現象である。

パワーエレクトロニクスの進歩は、その中核をなすパワー半導体デバイスの進歩でもあり、1950年代に実用化が広まったサイリスタにより飛躍的な発達を遂げた。当時は主に交流から直流への変換装置として利用され、数百ボルト、数万アンペア以上の大形整流装置が電解プロセスなどへの適用や、直流電動機の速度制御用として活用された。この変換装置による高調波発生と対策法の研究も格段に進歩しその成果は障害発生の低減に大きく寄与し、特に大形装置の普及には不可欠な技術となった。その後サイリスタは平形素子による大容量化や高圧化、素子並列接続技術、素子直列接続技術、光サイリスタの開発などにより大容量装置が容易に製作可能となり、現在も主役のデバイスとして広く活用されている。一方、サイリスタは自身では電流遮断ができないことから、適用の範囲に限度があったが、近年になり大容量の自己消弧形デバイスの飛躍的な進歩が遂げられ、性能と価格両面において、製品応用への展開をきわめて容易としている。サイリスタから最新の自己消弧形デバイスに至る発達の経緯と動向を図1に示すが、主なデバイスであるGTO(Gate Turn-Off Thyristor)、IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor)、MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、BJT(Bipolar Junction Transistor)の適用範囲比較を図2に紹介する。最近の動向としては、スイッチング性能に優れかつ回路構成の容易なMOS形ゲート構造のIGBTやMOSFETが主流となりつつある。いずれもきわめて高速・高性能の制御を必要とするにもかかわらず、高度な電子制御装置と組み合わせることによって容易に製品への応用が可能である。

図3は応用製品の生産例として、可変速装置の生産量の推移を示すものであるが、1990年代になっても増加し続けている。しかし、この応用製品は、一般産業・電力・交通などの比較的容量の大きい装置に限らず、むしろ民生用や

図1 パワー半導体デバイスの発展経過と今後の動向

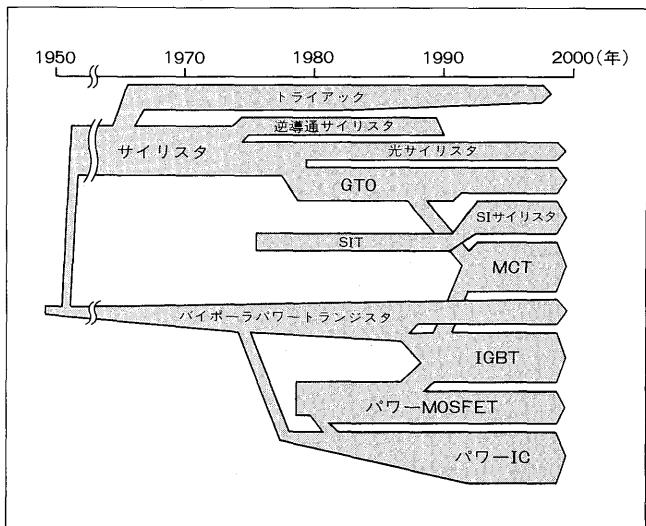


図2 自己消弧形パワーデバイスの適用範囲

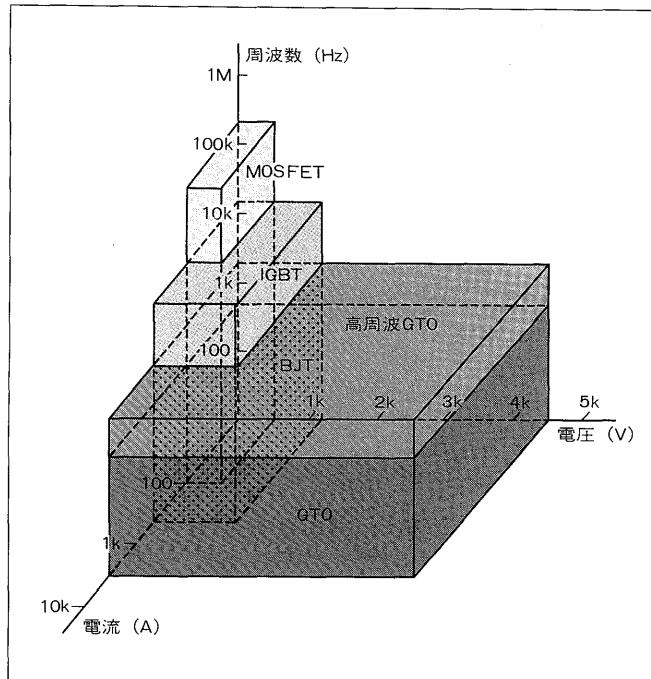
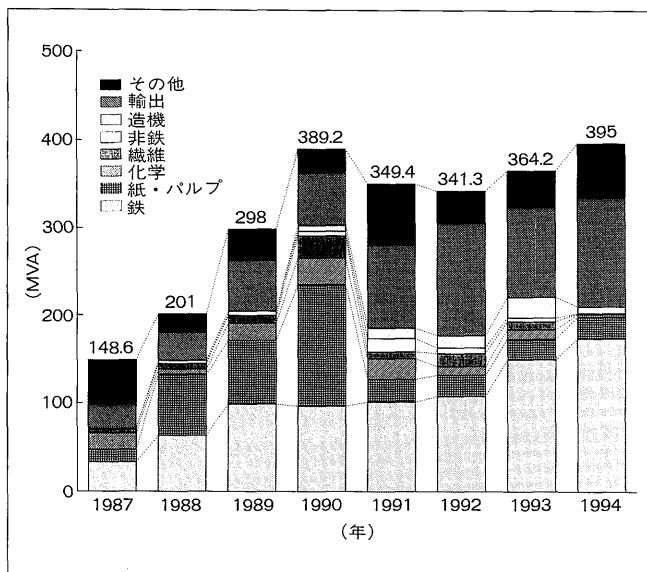


図3 交流可变速納入実績の推移



家庭用の製品に多く採用されつつある。応用の用途も多岐にわたることから、分散設置の状況が顕著であり、これに伴う高調波発生機器も広い範囲に分散されることになる。この動向は高調波発生源が、従来の局所集中形から多点分散形へ変化することであり、抑制技術もこれに適合した姿に変化しなければならないことを意味しているが、抑制技術の場面においても前記の自己消弧形デバイスの活用が積極的に行われつつあり、従来の対策法を凌駕（りょうが）する成果が得られている。

#### 4 高調波抑制対策技術

##### 4.1 抑制対策の考え方

高圧または特別高圧で受電する需要家を対象とした場合、

高調波の抑制方法として「どこで抑制するか」という場所の課題があり、下記の3点が考えられる。

- (1) 発生負荷内
- (2) 電力需要家構内
- (3) 電力供給側

このなかで発生負荷内の抑制は最も確実であるが、対策には製品ごとに相当の経済的負担を要すること、その技術が応用されていない膨大な量の既設製品が存在することなどの不具合を避け得ない。電力需要家構内での抑制対策は、抑制指標が一元化されたことから、(1)の対策と後述する並列接続形の組合せによって今後さらに充実した対策が可能となっていくと考え得るが、対策の効果、経済性、設置スペース、保全性などの条件を考慮して最も効果的な方策が選定されるべきであろう。他方(1)や(2)の方策を強力に推進しても、高調波の流出を零に抑えることは、当面の間に開発されるであろういずれの技術をとっても困難である。需要家からの流出が完全にならない限り、電力系統の高調波問題がなくなることはない。したがって、電力系統の最適な運用や場合によっては電力系統内に何らかの対策装置が必要なこともあり得るので、将来にわたって、高品質な電力を確保するためには、上記3点にかかる企業、技術者が協力して対策を進めることが重要である。

##### 4.2 高調波発生量の低減技術

サイリスタやダイオードを利用した順方向電力変換装置では、整流器用の変圧器を多相化すれば装置全体からの発生量を減らすうえで有効であることは本特集号の別稿（パワーエレクトロニクス応用装置の発生する高調波）にて紹介するとおりであるが、この方法にも限界や制約がある。課題となっている分散設置の中小容量の機器では、多相化が経済的にも設置面積の点からも実施困難なケースが多い。また、小容量の機器は単相の装置が多く採用されている状況にあるが、これらの領域では今後IGBTやBJTを利用した高調波レス整流器の開発により、大きな効果が得られるであろう。すでにPWM制御やSMR方式を標準的に採用した機種も商品化しており、今後さらに応用が増えていくと考えている。ガイドラインではPWM制御を利用した変換器の高調波等価容量は零としてよいとしている。

##### 4.3 発生高調波の吸収技術

負荷から発生した高調波は、その高調波の次数に対するインピーダンスの分布に従って、最も流れやすい分路へ流入していく。したがって高調波発生負荷の近傍にインピーダンスの低い流れやすい分路を設ければ、電源側への流出が低減できることになる。代表的な装置がコンデンサとリアクトルを直列に接続し特定次数の高調波に対するインピーダンスを最低とする方式であり、最近ではパッシブフィルタと称されている。今までに最も多く利用されており、コンデンサの進相成分を力率改善用としても利用できることから、高い効果に加え経済性に富むことが大きな特長である。この特長の反面、無負荷時のフェランチ現象

による電圧の上昇や系統側 LC 成分との共振など、適用にあたっては慎重な事前検討を要することが多く、汎用性においての課題が指摘されてきた。しかしながら EMTP や高調波分流解析ソフトウェアによるシミュレーションがパソコン用コンピュータなどで簡便に実行できるようになつたことから、より確実なシステム設計が可能であることや、依然として経済的には優位であることから、当面は多用されるであろう。

他方、同期機の利用も古くから知られており、これまで多くの実績を経験している。もちろん主たる目的機能は電圧の安定化や電圧フリッカの改善にあつたが、経済性や保全性を除けばパッシブフィルタのような反作用も少なく安定動作の面では優れている。吸収効果ではそれほどの効果は期待できなかつたが、界磁回路を高周波にて励磁することによる、高調波インピーダンスの低減はその限界を超えると評価でき、今後の適用が期待されている。

#### 4.4 アクティプフィルタによる対策

この技術は自己消弧形デバイスの出現によって、可能となつた最新の対策法である。その原理は単純であり、負荷の発生した高調波を検出し、その電流位相と逆の位相の電流をアクティプフィルタから発生させ、両者の相殺により系統への流出量を低減するものである。パッシブフィルタが系統インピーダンスの影響を受けるのに対し、ほぼ絶縁された形の抑制が可能であることや、以下の特長を有しており、すでに多くの運転実績をもつている。

- (1) 低次から高次の高調波まで1台のフィルタで対策が可能である。
- (2) 進相・遅相領域での出力が可能である。  
(力率改善・電圧安定化との共用が可能)
- (3) フェランチ現象や共振などの現象がなく設置が容易である。
- (4) 並列接続が容易であり、多重化・大容量化が比較的簡単にいやすい。

富士電機ではデバイスとして MVA 以上の装置を GTO によっており、400 kVA から 5 kVA までの中小容量の装置を IGBT によって系列商品化しているが、IGBT の大容量化を強力に推進しており、单器にて MVA 級の装置も提供できるようになるであろう。

アクティプフィルタの現在の課題は、パッシブフィルタに対する経済性であるが、これも IGBT の性能改良や回路設計の改善等々に積極的に取り組んでおり、大幅な製作コストの改善が期待される。

#### 5 あとがき

高調波発生と抑制対策に関する技術は古くからのテーマであり、種々の研究が推進され成果をあげてきた。しかしながら半導体変換装置の普及は、それらの研究の進歩を上回る速さで社会の隅々まで浸透してきた。

一方で発生を規制する一元的な指標の不在が、対策技術の普遍化を阻らせていたが、国際的な動向ともあわせた形で指標の確立ができたことは、将来における電力品質確保の観点から實に意義深いと理解できる。

高調波の抑制対策技術は、電気機器製造者にとって開発提供すべき義務を負ったものであるとの認識に立ち、今後ともより優れた装置やシステムの開発に邁進していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 高調波抑制対策技術指針 (JEAG 9702-1995), 日本電気協会電気技術基準調査委員会 (1995)
- (2) 電力系統における高調波とその対策, 電気協同研究, Vol. 46, No.2 (1990)
- (3) 車両・情報端末機器・インバータ用半導体特集, 富士時報, Vol.68, No.5 (1995)
- (4) パワーエレクトロニクス応用機器特集, 富士時報, Vol.65, No.10 (1992)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。